

УДК 621.81:539.4

## МЕТОДИКА ПРИРАБОТКИ ТРИБОСИСТЕМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В. А. ВОЙТОВ<sup>а+</sup>, А. Ш. БЕКИРОВ<sup>а</sup>, А. В. ВОЙТОВ<sup>а</sup>, Б. М. ЦЫМБАЛ<sup>б</sup>

Представлены теоретические и экспериментальные исследования, которые позволили обосновать структуру программы приработки трибосистем, которая состоит из двух режимов. На первом режиме задаётся максимальная нагрузка, ниже нагрузки “заедания” при минимальной скорости скольжения. Такой режим назван адаптацией трибосистемы к внешним условиям. На втором режиме задаётся минимальная нагрузка и максимальная скорость скольжения. Получены переходные характеристики приработки трибосистем, которые позволяют установить взаимосвязь между конструкцией трибосистемы, рациональными режимами нагружения, временем приработки и износом за приработку. Практической значимостью работы является минимизация времени приработки и износа за период приработки.

**Ключевые слова:** трибосистема, приработка, методика приработки, адаптация трибосистемы, обучаемость, трибосистемы, износ за приработку.

**Введение.** Приработка трибосистем является завершающим технологическим этапом в процессе изготовления и, одновременно, начальным этапом эксплуатации машин. В процессе приработки формируются несущие поверхностные слои трибосистем, обеспечивая в дальнейшем максимальный ресурс и минимальные потери на трение. Результаты исследований многих учёных позволяют утверждать, что завершение процесса приработки сводится не только к формированию оптимальной шероховатости сопряжённых поверхностей в трибосистеме, а включает в себя физико-химические явления, такие как тепловые, диффузионные, деформационные, которые имеют место в зоне трения в присутствии смазочных сред и окружающей среды. Поэтому сокращение процесса приработки, с одновременным повышением эффективности, позволит значительно увеличить ресурс машин и механизмов, что обеспечит экономический эффект в процессе эксплуатации.

Фундаментальной работой, которая посвящена процессам приработки, можно считать работу [1]. В данной работе проведён системный анализ и комплексные исследования процессов приработки, на основании которых сформулирован вывод о выполнении процесса приработки на грани заедания. В последующих работах [2] авторами выполнен анализ различных видов приработки, где отмечается, что наиболее распространённой является приработка со ступенчато увеличивающейся нагрузкой. При этом авторы делают вывод, что наиболее эффективной является приработка на грани заедания. Авторами работы [3] делается вывод, что для эффективности проведения приработки необходимо применять три режима. Первый, проходит на микрогеометрическом уровне для сглаживания и срезания микронеровностей поверхностей трения. В течение второго режима интенсивность изнашивания снижается, поверхности трения упрочняются, уменьшаются потери на трение. Третий, завершающий режим, характеризуется стабилизацией интенсивности изнашивания, потерь на трение и температуры. Переход от режима к режиму осуществляется изменением нагрузки и скорости скольжения.

На основании большого объёма экспериментальных работ автором [4, 5] делается вывод об эффективности приработки со ступенчато увеличивающейся нагрузкой. Установлено, что на каждой ступени нагрузки интенсивность взаимодействия поверхностей наиболее высокая и доминирующим видом при этом является пластическая деформация. По мере реализации приработочных эффектов различной природы, напряженно-деформированное состояние поверхности преобразуется в упругопластическую, а затем в упругую деформацию, как наименее энергозатратную. В работе [6] исследовались особенности антифрикционных материалов узлов трения машин на приработываемость в зависимости от характера изменения внешнего нагрузочного воздействия. Автором установлено, что эффективная приработка возможна в том случае, если работа узла трения проходит в режиме устойчивого смешанного трения. Показано, что определяющим параметром внешнего воздействия является нормальная нагрузка и в меньшей степени скорость скольжения.

а Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко. Украина, 61002, г. Харьков, ул. Алчевских, 44.

б Национальный университет гражданской защиты Украины. Украина, 61023, г. Харьков, ул. Чернышевская, 94.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: vavoitovva@gmail.com.

Подводя итог анализу работ, посвящённых режимам приработки, можно сделать вывод, что новизной данного исследования является методический подход в получение теоретических зависимостей изменения скорости изнашивания, коэффициента трения и времени приработки, которые позволят обосновать и разработать программу эффективной приработки различных конструкций трибосистем.

**Цель работы** — обоснование и разработка структуры программы приработки различных конструкций трибосистем с экспериментальной проверкой её эффективности.

**Материалы и инструменты.** Объектом исследований в данной работе является системный анализ и комплексные исследования процессов приработки различных трибосистем.

Для моделирования процесса приработки выбрали лабораторную трибосистему для машины трения УМТ-1: сталь 40Х (подвижный трибоэлемент, внутреннее трение структуры материала  $\delta_n = 2644$ ) + Бр. АЖ 9-4 (неподвижный трибоэлемент  $\delta_n = 3494$ ). Коэффициент взаимного перекрытия  $K_{вз} = 0,5$ , коэффициент формы  $K_{\phi} = 12,5 \text{ } 1/\text{м}$ . Смазочная среда — моторное масло М-10Г2к, трибологические свойства  $E_y = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$ . Температуропроводность стали  $a_n = 1,27 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , температуропроводность бронзы  $a_n = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , шероховатость поверхностей трения,  $R_a = 0,2 \text{ мкм}$ .

Экспериментальные исследования проводились на машине трения УМТ-1, трибосистема: сталь 40Х + Бр.АЖ 9-4. Параметры трибосистемы и смазочная среда одностипны тем, которые применялись при моделировании. В процессе эксперимента, через каждые 100 секунд, регистрировали значения момента трения, который пересчитывали в коэффициент трения, а также значения мощности акустической эмиссии, по величине которой определяли скорость изнашивания [7, 8].

Время приработки определили по стабилизации скорости изнашивания и коэффициента трения относительно установившегося значения. Результаты экспериментов на каждой из программ повторяли 3 раза, с расчётом значений критерия Кохрена для подтверждения воспроизводимости результатов от опыта к опыту.

**Обоснование структуры программы приработки трибосистем.** На основании выполненного анализа работ под приработкой будем понимать переход трибосистемы из неравновесного, термодинамически неустойчивого состояния, в стационарное, равновесное состояние, в результате которого стабилизируются такие параметры, как скорость изнашивания, коэффициент трения, температура и шероховатость поверхностей трения. Такой переход связан с образованием особой, диссипативной структуры поверхностных слоёв трибоэлементов в результате самоорганизации. Задача создания таких условий решается двумя этапами.

На первом этапе выбирается конструкция трибосистемы (площади трения, объёмы под площадями трения), материалы трибоэлементов (реологические свойства структуры материалов и их температуропроводность), трибологические свойства смазочной среды. Первый этап выполняется в процессе проектирования трибосистемы и в процессе приработки и эксплуатации не изменяется.

Второй этап связан с выбором программы приработки, которая может содержать несколько режимов. Назначение режимов определяется величиной добротности трибосистемы, которая определяет величины нагрузки и скорости скольжения в процессе приработки [9].

В процессе второго этапа последовательно происходит процесс преобразования механической энергии трения во внутреннюю энергию, в первую очередь тепловую, которая за счёт температуропроводности материалов рассеивается в окружающую среду, а также энергию структурных изменений поверхностных и подповерхностных слоёв материалов трибоэлементов.

Если величина механической энергии (энергии накачки) превысит допустимый предел, который определяется величиной добротности трибосистемы [9], может произойти потеря устойчивости трибосистемы, т. е. задиры или схватывание поверхностей трения трибоэлементов.

Анализ работ, посвящённых приработке трибосистем, позволяет сделать вывод, что минимальное время приработки обеспечивается на режиме “на грани заедания”, когда энергия накачки составляет примерно 90% от энергии задира или схватывания.

Энергию накачки или мощность, которая подводится к трибосистеме  $W$ , можно определить выражением:

$$W = N v_{\text{скл}} = H \times \frac{M}{c} = W_t, \quad (1)$$

где  $N$  — нагрузка,  $H$ ,  $v_{\text{скл}}$  — скорость скольжения, м/с.

Следовательно, первой составляющей программы приработки является выполнение условия  $W = \text{const}$ . При этом величина  $W$  не должна превышать 90% энергии накачки, которая приведёт к заряду поверхностей трения трибосистемы.

Второй составляющей программы является то, что, изменяя обратно пропорционально величины нагрузки  $N$  и скорости скольжения  $v_{\text{скл}}$  (обеспечивая  $W = \text{const}$ ), процессом приработки можно управлять.

В основе обоснования режимов приработки трибосистем положим выполнение следующих условий:

- минимальное время завершения переходного процесса,  $t_{\text{пр}} \rightarrow \min$ ;
- минимальную величину скорости изнашивания на установившемся режиме, т.е. после завершения приработки,  $I_{\text{уст}} \rightarrow \min$ ;
- минимальную величину коэффициента трения после завершения приработки,  $f_{\text{уст}} \rightarrow \min$ .
- минимальную величину износа за время приработки, которую можно выразить, как  $U \rightarrow \min$ .

Начало процесса приработки сопровождается интенсивной деформацией шероховатостей поверхности трения и формированием равновесной шероховатости. В связи с тем, что структура поверхностей трения изменяется не мгновенно, а с определенной инерционностью, то трибосистема может потерять устойчивость, в результате возникает задира.

Для снижения чувствительности трибосистемы к задирам необходимо уменьшать критерий  $K_1$ . Одним из эффективных путей уменьшения  $K_1$  — это уменьшение скорости скольжения, это следует из выводов работы [9].

Одновременно с формированием равновесной шероховатости поверхностей трения идёт процесс перестройки структуры поверхностных слоёв с образованием окисных плёнок и вторичных структур, который оценивается критерием прирабатываемости  $K_2$ . Одним из путей повышения критерия прирабатываемости является уменьшение скорости скольжения, это следует из выводов работы [9].

На основании выполненного обоснования, в основе которого лежат выводы работы [9], запишем первый режим программы приработки:

$$N = \max; v_{\text{скл}} = \min, \text{ при } W = \text{const.} \quad (2)$$

При этом, минимальное значение скорости скольжения выбирается таким, чтобы обеспечить оптимальные значения декрементов затухания колебаний скорости изнашивания  $d_I$  и коэффициента трения  $d_f$  [9].

После формирования равновесной шероховатости на поверхностях трения необходим переход ко второму режиму приработки. Назначение второго режима — уменьшить инерционность переходных процессов в поверхностных слоях, т. е. завершить формирование структуры поверхностных слоёв (увеличение твёрдости, образование вторичных структур и окисных плёнок) за минимальное время. Одним из путей снижения критериев инерционности трибосистем, согласно работе [9] — постоянных времени, является увеличение скорости скольжения.

На основании приведённого обоснования запишем второй режим программы приработки:

$$N = \min; v_{\text{скл}} = \max, \text{ при } W = \text{const.} \quad (3)$$

При этом максимальное значение скорости скольжения выбирается из условия обеспечения оптимальных значений декрементов затухания  $d_I$  и  $d_f$  [9].

Время завершения первого режима программы, а также второго режима, определяется по результатам моделирования, методика которого изложена в [9]. При этом определяются следующие значения: максимальный заброс величины скорости изнашивания  $I_{\text{max}}$  и коэффициент трения  $f_{\text{max}}$  во время приработки; установившееся значение скорости изнашивания  $I_{\text{уст}}$  и коэффициента трения  $f_{\text{уст}}$  после завершения приработки; время приработки по параметрам скорости изнашивания и коэффициента трения  $t_{\text{пр}}$  и величины линейного износа во время приработки  $U$ .

**Моделирование процесса приработки трибосистемы по различным программам.** Выберем эксплуатационный режим нагрузки для трибосистемы. Согласно формуле (1) мощность, которая подводится к трибосистеме равна:

$$W_{\text{экс}} = N v_{\text{скл}} = 1040 \cdot 0,5 = 520 \text{ Вт} . \quad (4)$$

Примем данный режим за третий режим, режим эксплуатации после завершения приработки.

Первый режим приработки запишем согласно формулы (2):

$$W_1 = 2600 \cdot 0,2 = 520 \text{ Вт} . \quad (5)$$

Второй режим приработки запишем согласно формулы (3):

$$W_2 = 650 \cdot 0,8 = 520 \text{ Вт} . \quad (6)$$

Как следует из выражений (4)—(6) для всех трёх режимов выполняется равенство  $W = \text{const}$ .

Переходные характеристики процесса приработки трибосистемы сталь 40Х + Бр. АЖ 9-4 по параметру скорости изнашивания представлены на рис. 1, а по параметру коэффициента трения, на рис. 2. Номер кривой обозначает номер режима, а время:  $t_1$ ;  $t_2$ ;  $t_3$  — время приработки на каждом из режимов.

Величину износа за приработку  $U_1$ ;  $U_2$ ;  $U_3$  определим, как площадь под соответствующей кривой по формуле:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{I_i t_i}{F_{\text{тр}}} = \text{м}, \quad (7)$$

где  $n$  — число разбиений области под кривой на прямоугольные равномерные участки;  $I_i$  — скорость изнашивания на единичном участке,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $t_i$  — время работы на единичном участке, равное 100 секунд;  $F_{\text{тр}}$  — суммарная площадь трения подвижного и не подвижного трибоэлементов,  $0,00045 \text{ м}^2$ .

Анализ переходных кривых на рис. 1 позволяет сделать вывод, что максимальный износ за приработку  $U_2 = 1,199 \text{ мкм}$  будет при применении второго режима:  $N = 650 \text{ Н}$ ;  $v_{\text{скл}} = 0,8 \text{ м/с}$ ; при этом время приработки имеет среднее значение из трёх режимов, равное  $t_2 = 1100 \text{ с}$ .

Износ за приработку по первому режиму составит  $U_1 = 0,988 \text{ мкм}$ , а  $t_1 = 1400 \text{ с}$ . Износ за приработку по третьему режиму  $U_3 = 0,905 \text{ мкм}$ ,  $t_3 = 900 \text{ с}$ .

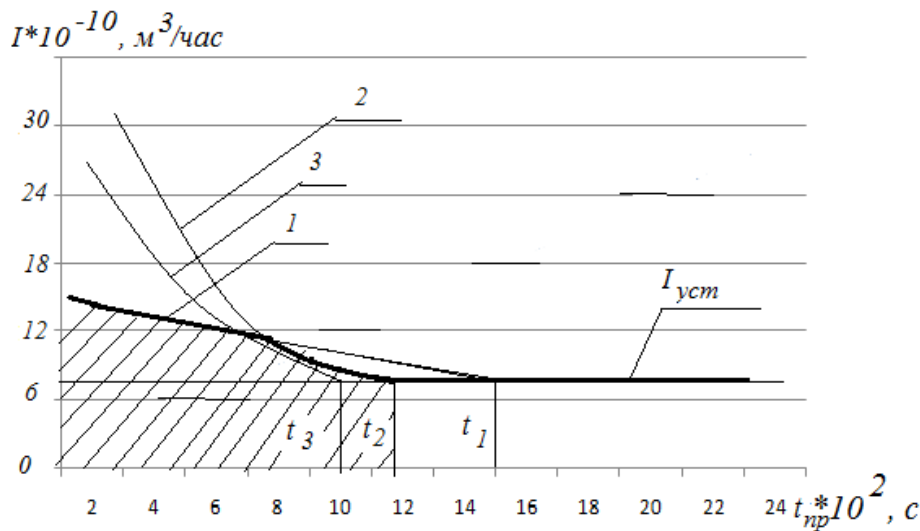


Рис. 1. Переходные характеристики процесса приработки трибосистемы сталь 40Х + Бр.АЖ 9-4 по параметру скорости изнашивания

Анализ переходных кривых коэффициента трения, рис. 2, позволяет сделать вывод, что минимальное отклонение от установившегося значения и минимальное время приработки характерно для второго режима,  $t_2 = 1100 \text{ с}$ .

Переходной процесс по коэффициенту трения на первом режиме:  $N = 2600 \text{ Н}$ ;  $v_{\text{скл}} = 0,2 \text{ м/с}$ ; имеет самое большое время приработки  $t_1 = 2400 \text{ с}$  и самое большое отклонение  $f_{\text{max}} = 0,068$  от установившегося значения  $f_{\text{уст}} = 0,054$ .

Совместный анализ режимов приработки (рис. 1 и рис. 2), позволяет обосновать программу приработки трибосистемы при выполнении условий:  $U \rightarrow \min$ ,  $t_{\text{пр}} \rightarrow \min$ . Согласно рис. 1 приработку необходимо начинать на первом режиме:  $N = 2600 \text{ Н}$ ;  $v_{\text{скл}} = 0,2 \text{ м/с}$ . При достижении времени  $t_{\text{пр}} = 700 \text{ с}$ , когда происходит пересечение кривых 1 и 2, необходимо перейти на второй режим:  $N = 650 \text{ Н}$ ;  $v_{\text{скл}} = 0,8 \text{ м/с}$ . Переходная характеристика такой программы обозначена на рис. 1 жирной линией. Суммарный износ за приработку (заштрихованная площадь под жирной кривой) составит  $U = 0,840 \text{ мкм}$ , а время приработки  $t = 1100 \text{ с}$ .

Величины декрементов затухания для скорости изнашивания на первом режиме равны  $d_I = 0,62$ , а на втором режиме  $d_I = 0,98$ . Это свидетельствует о том, что в начале процесса присутствуют незначительные колебания, а в конце процесса — колебания отсутствуют, это следует из выводов работы [9].

Величины декрементов затухания для коэффициента трения на первом режиме равны  $d_f = 0,52$ , а на втором режиме  $d_f = 0,64$ . Это свидетельствует о том, что процесс приработки по коэффициенту трения происходит с колебаниями, величина которых к завершению приработки затухает.

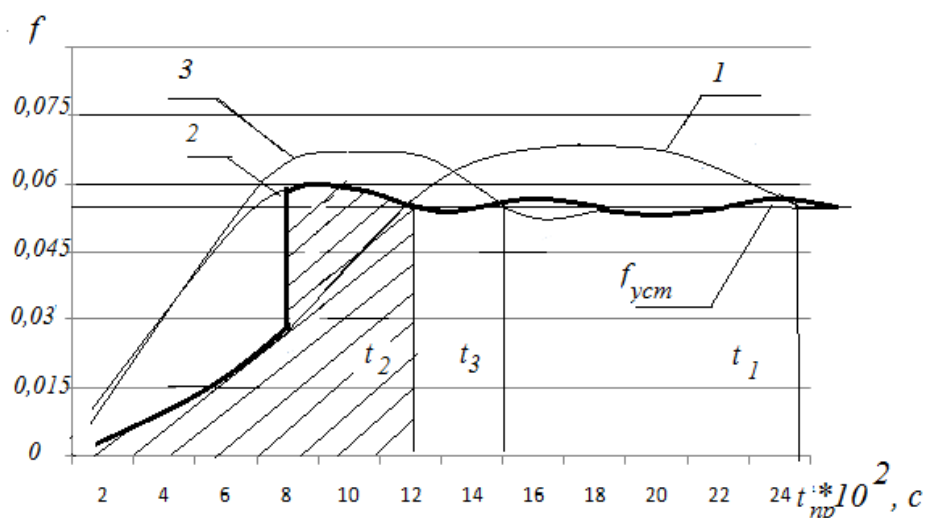


Рис. 2. Переходные характеристики процесса приработки трибосистемы сталь 40X + Бр.АЖ 9-4 по параметру коэффициента трения

Анализ кривых на рис. 1 свидетельствует, что более рациональная программа с режима 1 на режим 3. При таком варианте  $t_{пр} = 900$  с. Однако такой путь значительно увеличит время приработки по коэффициенту трения до 1400с, рис. 2.

Приработка по программе: первый режим (время приработки 700 с), затем второй режим, назовём её первой программой, позволит завершить переходный процесс по стабилизации коэффициента трения за 1100 с. Такая программа изображена на рис. 2 жирной линией. Площадь под заштрихованной кривой характеризует потери на трение. При этом время приработки до стабилизации скорости изнашивания и коэффициента трения совпадает и равно  $t_{пр} = 1100$  с.

Приработка трибосистемы по режиму 1, а затем переход на режим 3, значительно увеличит время приработки по коэффициенту трения до  $t_3 = 1400$ с.

Обоснованная по результатам моделирования программа приработки в дальнейшем будет подтверждена экспериментально.

Для сравнения рассмотрим обратную программу приработки (вторая программа), где режимы нагружения применим в обратном порядке.

- Второй режим:  $N = 650$  Н;  $v_{скл} = 0,8$  м/с.
- Первый режим:  $N = 2600$  Н;  $v_{скл} = 0,2$  м/с.

Результаты моделирования переходных процессов в трибосистеме сталь 40X + Бр.АЖ9-4 представлены на рис. 3 и рис. 4.

Анализ кривых на рис. 3 позволяет сделать вывод, что начало приработки по второму режиму, кривая 2, а затем переход на пересечение с кривой 1 на первый режим, приведёт к самому большому износу за приработку  $U = 1,560$  мкм, а время приработки 1400 с. При такой программе время приработки до стабилизации коэффициента трения, рис. 4, составит  $t = 2400$  с. Такая программа приработки изображена на рис. 3 и рис. 4 жирной пунктирной линией.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что программа приработки: режим 2 → режим 1, не является рациональной, т. к. приводит к максимальному износу за приработку  $U = 1,560$  мкм, и максимальному времени приработки  $t = 2400$  с.

Величина декрементов затухания для переходных процессов на режиме 2 равны  $d_l = 0,98$ ,  $d_f = 0,64$ . Это свидетельствует об отсутствии колебательности у скорости изнашивания и незначительных колебаний у коэффициента трения.

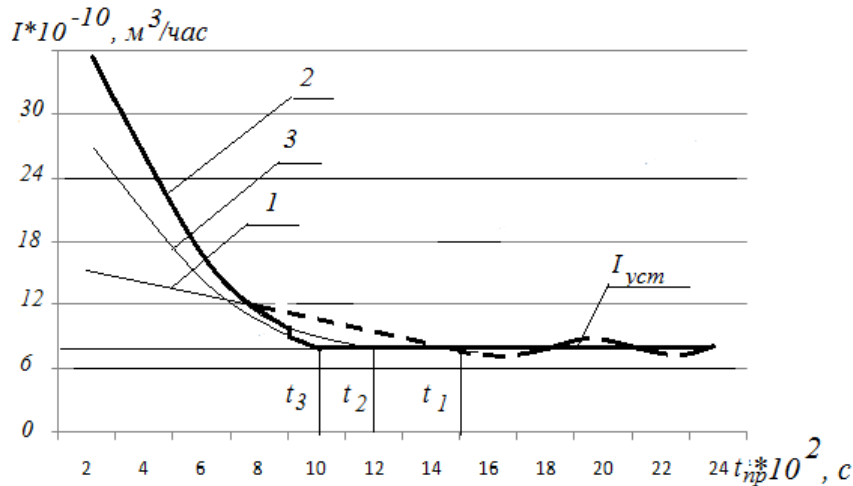


Рис. 3. Переходные характеристики процесса приработки трибосистемы сталь 40X + Бр.АЖ 9-4 по параметру скорости изнашивания при применении обратной программы

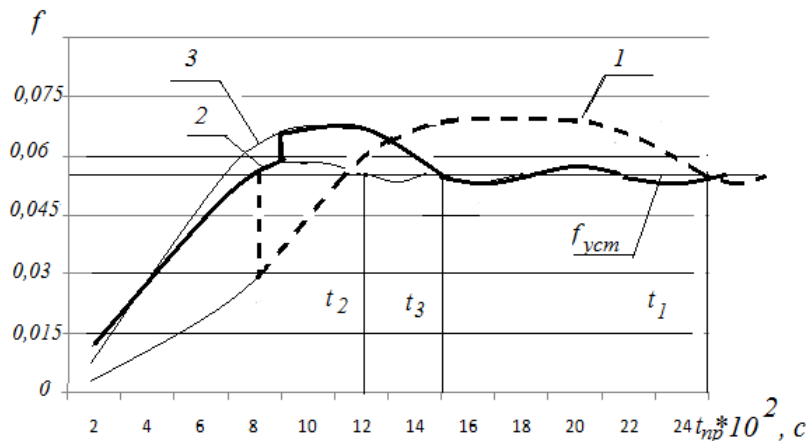


Рис. 4. Переходные характеристики процесса приработки трибосистемы сталь 40X + Бр.АЖ 9-4 по параметру коэффициента трения при применении обратной программы

При переходе со второго режима на первый, величины декрементов затухания равна  $d_I = 0,62$ ,  $d_f = 0,52$ . Это свидетельствует о том, что в переходных процессах, как по скорости изнашивания, так и по коэффициенту трения появляется колебательность.

Более рациональной программой для рассмотренных переходных характеристик является следующая последовательность режимов: режим 2 → режим 3. Такая программа, (третья программа), изображена на рис. 3 и рис. 4 жирной сплошной линией.

При такой программе износ за приработку составит  $U = 1,083$  мкм, при времени приработки  $t = 900$ с, а время приработки до стабилизации коэффициента трения составит  $t = 1400$ с.

По результатам проведённого моделирования можно сделать вывод, что из рассмотренных трёх вариантов программ приработки трибосистемы сталь 40X + Бр.АЖ 9-4 наиболее эффективной является первая программа: режим 1 → режим 2, а затем переход на 3 режим — режим эксплуатации. Как отмечалось выше, при такой последовательности износ за приработку будет иметь минимальное значение  $U = 0,840$  мкм, а время стабилизации скорости изнашивания и коэффициента трения  $t = 1100$ с.

**Обсуждение результатов.** Сравнение результатов моделирования и эксперимента для трибосистемы сталь 40X + Бр.АЖ 9-4 при применении первой программы представлено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Время процесса приработки $t$ , с	$I_m \cdot 10^{-10}$ , м <sup>3</sup> /ч	$I_{экс} \cdot 10^{-10}$ , м <sup>3</sup> /ч (среднее значение)	$e_I$ , %	$f_m$	$f_{экс}$ (среднее значение)	$e_f$ , %
Первый режим $N = 2600$ Н, $v_{скл} = 0,2$ м/с						
100	14,8	16,2	8,6	0,0011	0,0012	8,3

200	14,5	16,2	10,4	0,0042	0,0044	9,0
300	14,0	15,6	10,2	0,0088	0,0091	2,2
400	13,47	14,5	7,1	0,014	0,015	6,6
500	12,8	13,4	4,4	0,02	0,022	9,0
600	12,2	12,8	4,6	0,026	0,028	7,1
700	11,6	11,8	1,7	0,033	0,03	10,0
Второй режим $N = 650$ Н, $v_{\text{скл}} = 0,8$ м/с						
800	9,95	9,0	10,5	0,057	0,055	3,6
900	9,39	9,0	4,3	0,057	0,055	3,6
1000	9,06	8,8	2,9	0,055	0,052	5,7
1100	8,87	8,6	3,1	0,054	0,051	5,8
Параметры установившегося процесса трения						
1200	8,87	8,6	3,1	0,054	0,051	5,8

Анализ результатов табл. 1 позволяет сделать вывод, что ошибка моделирования процесса приработки скорости изнашивания не превышает  $e_t = 10,5\%$ , а коэффициента трения  $e_f = 10,0\%$ . Ошибка моделирования времени приработки  $e_t = 8,3\%$ .

В начале процесса приработки (на первом режиме согласно табл. 1) присутствуют колебания, как скорости изнашивания, так и коэффициента трения. В конце процесса приработки (на втором режиме), колебания по параметру скорости изнашивания отсутствуют, а по параметру коэффициента трения остаются. Данные экспериментальные факты совпадают с результатами моделирования.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента для аналогичной трибосистемы при применении второй (обратной) программы приработки, представлено в табл. 2.

Анализ результатов моделирования и эксперимента позволяет сделать вывод, что при применении второй программы ошибка моделирования увеличивается. Для скорости изнашивания равна  $e_t = 12,9\%$ , для коэффициента трения  $e_f = 14,4\%$ . При этом наблюдается значительная колебательность процесса приработки, как по параметру скорости изнашивания, так и по параметру коэффициента трения. Ошибка моделирования времени приработки по скорости изнашивания составляет  $e_t = 12,5\%$ , а по коэффициенту трения  $e_f = 12,0\%$ .

Результаты эксперимента подтверждают полученный путём моделирования вывод, что вторая (обратная) программа приработки, которая начинается со второго режима ( $N = 650$  Н;  $v_{\text{скл}} = 0,8$  м/с), а затем переход на первый режим ( $N = 2600$  Н;  $v_{\text{скл}} = 0,2$  м/с), является не эффективной, по сравнению с первой программой.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента для аналогичной трибосистемы при применении третьей программы представлены в табл. 3.

Отличия данной программы от ранее представленных, состоит в том, что приработка осуществляется при ступенчатом увеличении нагрузки до эксплуатационной, при соблюдении условий  $W = \text{const}$ .

Как следует из представленных в табл. 3 результатов, ошибка моделирования по скорости изнашивания составляет  $e_t = 14,2\%$ , а по коэффициенту трения  $e_f = 11,5\%$ . Ошибка моделирования по времени приработки не превышает  $8,0\%$ .

Экспериментальные исследования позволили установить, что в начале процесса приработки колебания, как по скорости изнашивания, так и по коэффициенту трения, отсутствуют. После перехода со второго режима на третий, появляются колебания только у коэффициента трения, что соответствует выводам по результатам моделирования, изложенным выше.

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Время процесса приработки $t$ , с	$I_M \cdot 10^{-10}$ , м <sup>3</sup> /ч	$I_{\text{жс}} \cdot 10^{-10}$ , м <sup>3</sup> /ч (среднее значение)	$e_f$ , %	$f_M$	$f_{\text{жс}}$ (среднее значение)	$e_f$ , %
Второй режим $N = 650$ Н, $v_{\text{скл}} = 0,8$ м/с						
100	38,2	43,0	11,1	0,0027	0,0029	6,8
200	30,6	34,0	10,0	0,023	0,025	8,0
300	23,7	27,0	12,2	0,037	0,042	11,9
400	18,4	21,0	12,3	0,048	0,054	11,1
500	14,8	17,0	12,9	0,054	0,06	10,0
600	12,4	13,0	4,6	0,057	0,064	10,9
700	10,88	10,0	8,8	0,057	0,062	8,0
Первый режим $N = 2600$ Н, $v_{\text{скл}} = 0,2$ м/с						
800	10,3	9,8	5,1	0,039	0,042	7,1
900	10,05	9,6	4,6	0,044	0,048	8,3
1000	10,0	9,4	6,3	0,049	0,053	7,5
1100	9,6	9,2	4,3	0,053	0,057	7,0
1200	9,2	9,0	2,2	0,057	0,06	5,0

ОБОСНОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ПРИРАБОТКИ ТРИБОСИСТЕМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

1300	8,9	8,4	5,9	0,06	0,064	6,2
1400	8,84	8,6	2,7	0,062	0,066	6,0
1500	8,82	8,6	2,5	0,063	0,07	10,0
1600	8,8	8,6	2,3	0,064	0,072	12,1
1700	8,82	8,6	2,5	0,065	0,076	14,4
1800	8,84	8,6	2,8	0,065	0,072	9,7
1900	8,86	8,7	1,8	0,064	0,072	11,1
2000	8,88	9,0	1,3	0,064	0,072	12,1
2100	8,88	9,2	3,4	0,063	0,071	11,2
2200	8,86	9,3	4,7	0,062	0,068	8,8
2300	8,84	9,3	4,9	0,061	0,064	4,6
2400	8,82	9,2	4,1	0,06	0,062	3,2
2500	8,8	9,0	2,2	0,059	0,06	1,6
2600	8,8	9,0	2,2	0,059	0,062	4,8
2700	8,82	9,2	4,1	0,058	0,064	9,3
2800	8,84	9,3	4,9	0,056	0,066	13,6
Параметры установившегося процесса трения						
2900	8,8	9,0	2,2	0,056	0,06	6,6

Таблица 3. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Время процесса приработки $t$ , с	$I_m \cdot 10^{-10}$ , $M^3/ч$	$I_{экс} \cdot 10^{-10}$ , $M^3/ч$ (среднее значение)	$e_t$ , %	$f_m$	$f_{экс}$ (среднее значение)	$e_f$ , %
Второй режим $N = 650$ Н, $v_{скл} = 0,8$ м/с						
100	38,2	42,0	9,0	0,0027	0,003	10,0
200	30,6	33,0	10,9	0,023	0,026	11,5
300	23,7	26,0	14,2	0,037	0,04	7,5
400	18,4	20,0	12,0	0,048	0,052	7,6
500	14,8	16,0	7,5	0,054	0,059	8,4
600	12,4	13,5	8,1	0,057	0,061	6,5
700	10,88	10,0	8,8	0,057	0,062	8,0
Третий режим $N = 1040$ Н, $v_{скл} = 0,5$ м/с						
800	9,19	9,0	2,1	0,061	0,063	3,1
900	8,65	8,5	1,7	0,061	0,063	3,1
1000	8,37	8,0	4,6	0,06	0,062	3,2
1100	8,27	8,0	3,3	0,059	0,06	1,6
1200	8,27	8,0	3,3	0,057	0,058	1,7
1300	8,32	8,0	4,0	0,056	0,057	1,7
1400	8,63	8,5	1,5	0,054	0,055	1,8
Параметры установившегося процесса трения						
1500	8,65	8,5	1,7	0,054	0,055	1,8

Результаты экспериментальных исследований подтвердили выводы, полученные с помощью математического моделирования. Математическая модель, которая разработана в работе [9], позволяет обосновать режимы приработки для каждой конкретной трибосистемы. Входными параметрами являются: геометрические размеры трибосистемы, которые учитываются коэффициентом формы,  $K_f$ ; сочетание материалов подвижного и неподвижного трибоземента, которое учитывается внутренним трением,  $\delta_n$ ,  $\delta_n$ ; трибологические свойства смазочной среды,  $E_y$ ; исходная шероховатость поверхностей трения; нагрузка,  $N$ ; скорость скольжения,  $v_{скл}$ . Следовательно, для каждой конструкции трибосистемы, путём моделирования, будет получена индивидуальная программа приработки, которая будет состоять из двух режимов.

**Выводы.** На основе проведённых теоретических и экспериментальных исследований разработана и обоснована структура программы приработки трибосистем, которая состоит из двух режимов. На первом режиме задаётся максимальная нагрузка, ниже нагрузки “заедания” при минимальной скорости скольжения. Такой режим позволяет за счёт интенсивной деформации микровыступов сформировать равновесную шероховатость поверхностей трения и изменить структуру тонких поверхностных слоёв. Первый режим можно назвать адаптацией трибосистемы к внешним условиям. На втором режиме задаётся минимальная нагрузка и максимальная скорость скольжения. Такой режим позволяет уменьшить время перестройки структуры материала поверхностных слоёв и завершить образование вторичных структур и окисных плёнок. Второй режим можно назвать обучаемостью и тренируемостью трибосистемы.

Получены переходные характеристики приработки трибосистем, которые позволяют установить взаимосвязь между конструкцией трибосистемы, рациональными режимами нагружения, временем приработки и износом за приработку. Практической значимостью работы является минимизация времени приработки и износа за период приработки.



## ОБОЗНАЧЕНИЯ

УМТ-1 — Универсальная машина трения;  $W$  — энергия накачки или мощность, которая подводится к трибосистеме;  $N$  — нагрузка;  $v_{\text{скл}}$  — скорость скольжения;  $t_{\text{пр}}$  — время завершения переходного процесса;  $I_{\text{уст}}$  — скорость изнашивания на установившемся режиме;  $I_{\text{max}}$  — максимальное значение скорости изнашивания во время приработки;  $f_{\text{уст}}$  — коэффициент трения после завершения приработки;  $f_{\text{уст}}$  — максимальное значение коэффициент трения во время приработки;  $U$  — величина износа за время приработки;  $d_l$  — декремент затухания колебаний скорости изнашивания;  $d_f$  — декремент затухания колебаний коэффициента трения;  $\delta_n$  — внутреннее трение структуры материала подвижного трибоэлемента;  $\delta_n$  — внутреннее трение структуры материала неподвижного трибоэлемента;  $K_{\text{ф}}$  — коэффициент формы трибосистемы;  $E_y$  — трибологические свойства смазочной среды;  $a_n$  — температуропроводность материала неподвижного трибоэлемента (бронзы);  $a_n$  — температуропроводность материала подвижного трибоэлемента (стали);  $R_a$  — шероховатость поверхностей трения;  $F_{\text{тр}}$  — суммарная площадь трения подвижного и неподвижного трибоэлементов;  $I_m$  — скорость изнашивания полученная по результатам моделирования;  $I_{\text{экс}}$  — скорость изнашивания полученная по результатам эксперимента;  $f_m$  — коэффициент трения полученный по результатам моделирования;  $f_{\text{экс}}$  — коэффициент трения полученный по результатам эксперимента;  $e_l$  — ошибка моделирования по скорости изнашивания;  $e_f$  — ошибка моделирования по коэффициенту трения;  $e_t$  — ошибка моделирования по времени приработки.

## Литература

1. Карасик И. И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. — М.: Наука. — 1978
2. Генкин В. А., Жарин А. Л., Фишбейн Е. И., Шипица Н. А., Терехов А. Л. Метод приработки материалов для узлов трения // Трение и износ. — 1989 (10), № 3, 530—534
3. Сергеев А. В., Денисова Н. Е. Приработка сложных технических систем с позиций надежности и изнашивания трения // Трение и износ. — 2004 (25), № 1, 22—28
4. Зелинский В. В. Феноменологические основы изофрикционной приработки опор скольжения машин. Часть 1 // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. — 2009, № 6, 117—121
5. Зелинский В. В. Феноменологические основы изофрикционной приработки опор скольжения машин. Часть 2 // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. — 2011, № 3, 48—52
6. Волченков А. В. Исследование антифрикционных материалов узлов трения на прирабатываемость // Современные проблемы науки и образования. — 2014, № 6; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16065> (дата обращения: 05.08.2018)
7. Свириденко А. И. [и др.] Акустические и электрические методы в триботехнике / под ред. В. А. Белого. — Мн.: Наука и техника. — 1987
8. Баранов В.М. [и др.] Акустическая эмиссия при трении. — М.: Энергоатомиздат. — 1998
9. Войтов В. А., Бекиров А. Ш. Математическая модель переходных процессов в трибосистемах и результаты моделирования // Проблеми трибології. — 2018, № 1, 18—27
10. Бершадский Л. И. Адаптивность и обучаемость трибосистем. — Киев: Общество “Знание” Украинской ССР. — 1987

Поступила в редакцию 12.09.18.

После доработки 09.07.19.

Принята к публикации \_\_. \_\_.1.

Vojtov V. A., Biekirov A. Sh., Voitov A. V., and Tsymbal B. M. **Methodology for Run-in Operation of Tribosystems and Experimental Verification of Its Efficiency**

Theoretical and experimental studies are presented which allowed to substantiate the structure of the tribosystem running program consisting of two modes. The maximum load is set in the first mode below the "jamming" load with the minimum sliding speed. This mode is called adaptation of the tribosystem to external conditions. Transitional characteristics of run-in operation of the tribosystems were received, which allows to establish the relationship between the engineering design of the tribosystem, rational loading conditions, run-in operation time and run-in operation wear. The practical significance of the work is to minimize run-in operation time and wear for run-in operation period.

**Keywords:** tribosystem, run-in, method of run-in, adaptation of the tribosystem, learnability, tribosystems, wear for run-in